气候变化下菟丝子属3种植物在中国的潜在地理分布

瞿宇阳， 文田田， 刘佳敏， 阎 平
（石河子大学生命科学学院，新疆 石河子 832003）

摘 要：菟丝子属（*Cuscuta*）植物因茎全寄生的特点全属均被列为检疫植物，探究菟丝子属植物在中国潜在空间分布特点对其防治有重要作用。本研究选取杯花菟丝子（*C. cupulata*）、原野菟丝子（*C. campestris*）、单柱菟丝子（*C. monogyna*）3种菟丝子属植物为研究对象，结合其已有地理分布记录932条、野外考察记录144条和20个环境变量，应用最大熵模型和ArcGIS，预测其在当前和未来（2041—2060年、2061—2080年）SSP2-4.5温室气体排放浓度场景下的潜在适生区分布，并将当前气候情景下菟丝子属3种植物的适生区与土地利用数据进行叠加分析。结果表明：(1) 受试者工作特征曲线下的面积（AUC）均大于0.9，预测精度较高。(2) 影响菟丝子属3种植物适生区分布的主要环境因子存在差异，但均是气候因子占主导，地形因子的贡献率相对较小。(3) 当前气候情景下杯花菟丝子与单柱菟丝子适生区多分布于我国北方，而原野菟丝子适生区除了在北方有分布外亦在东南沿海有大面积覆盖，并且未来3种菟丝子属植物均表现出向我国北部扩张的趋势。(4) 当前时期菟丝子属3种植物的适生区大部分土地已经被开发利用。

关键词：菟丝子属；MaxEnt模型；潜在适生区；适生区叠加；土地利用类型

气候是影响物种分布范围改变的主要驱动因子之一，全球气候变化正促使许多植物分布范围发生改变[1]。入侵植物虽然具有很强的生命力和繁殖力，但亦对环境因子变化非常敏感[2]，并且入侵植物的发生和衰退对当地生态系统的结构和功能有较大影响。因此，研究不同气候变化下入侵植物的潜在适生区分布格局变化，可以提前了解哪些区域面临入侵风险，从而为相关部门采取早期预警和防控措施提供理论依据。

菟丝子属（*Cuscuta*）作为旋花科（Convolvulaceae）代表性的属之一，其成员广布于温带和热带地区。该属植物作为典型的全寄生植物，在农业生态系统中已造成严重危害[3]，利用特化的吸器侵入宿主的维管束，吸取水分和养分，这种寄生行为会导致宿主植物生长受限，甚至枯萎死亡，从而严重影响作物的产量和质量[4]。而且当菟丝子属植物数量过多时也会对生态系统构成威胁[5-6]，它们会减少宿主植物为其他生物提供的生态位和资源[7]，影响其他植物的生长，甚至可能导致某些植物种的局部灭绝。因此菟丝子属植物相继被列为危险性有害生物和检疫性杂草[8]。目前，对菟丝子属的研究主要集中在形态分类[9]、化感作用[10]、综合防治[11]、药理成分[12]等领域，然而气候变化对菟丝子属植物分布格局的影响鲜见报道。

MaxEnt模型是可应用于概率密度评估的生态位理论模型[13]，利用物种已知分布点位和环境数据，模拟预测该物种在理想无约束情况下自由扩散能获得的最大生态位范围。本研究基于该模型对杯花菟丝子（*C. cupulata*）、原野菟丝子（*C. campestris*）、单柱菟丝子（*C. monogyna*）3种菟丝子属植物在中国当前及未来的适生区进行预测，并通过环境变量响应曲线分析影响3种菟丝子属植物潜在分布

收稿日期：2024-08-14； **修订日期**：2024-10-21
基金项目：国家自然科学基金（31870191）；新疆维吾尔自治区农业外来入侵物种普查（2022-2023东疆专项）；新疆生产建设兵团农业外来入侵物种普查（兵农科发〔2021〕139号）
作者简介：瞿宇阳（2000-），男，硕士研究生，研究方向为植物分类学. E-mail: 1071408474@qq.com
通讯作者：阎平. E-mail: 1229016867@qq.com

的主导环境因子，为科学防控菟丝子属植物的入侵提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 物种分布数据来源

杯花菟丝子、原野菟丝子、单柱菟丝子3种植物的分布位点通过本团队近年来在新疆地区野外实地调查，分别获得分布点6个、118个、20个；并查阅中国数字植物标本馆（https://www.cvh.ac.cn/）、全球生物多样性信息数据库（https://gbif.org/）、查阅已出版的文献资料等，共计获得菟丝子属3种植物全国分布点48个、950个、78个。基于上述分布点数据，为降低因群集效应造成的取样偏差，使用ENMTools软件剔除冗余数据避免过拟合[14]，该软件可以自动匹配分析所用环境因子栅格大小，删除同一栅格内的冗余数据，提高模型预测结果的精度，最终分别保留32个、433个、44个有效分布点。

1.2 环境变量

从全球气候和天气数据库（WorldClim，https://www.worldclim.org）获取空间分辨率为2.5 arc-minutes的19个气候因子和海拔数据（表1），包含了当前（1970—2000年）和未来（2041—2060年、2061—2080年）3个时间段的环境因子数据，未来气候数据选择第六次国际耦合模式比较计划（CMIP6）中BCC-CSM2-MR气候模式下SSP2-4.5共享社会经济路线情景，BCC-CSM2-MR模式可以较好的再现近地层大气平均温度[15-16]，因此可以更准确的体现气候情景。

表1 候选环境变量因子

Tab. 1 Candidate environment variable factors

环境变量代码	变量描述	单位
Bio1	年平均温度	℃
Bio2	昼夜温差月均值	℃
Bio3	昼夜温差与年温差比值	-
Bio4	温度季节性变化标准差	-
Bio5	最热月最高温	℃
Bio6	最冷月最低温	℃
Bio7	气温年较差	℃
Bio8	最湿季平均温度	℃
Bio9	最干季平均温度	℃
Bio10	最热季平均温度	℃
Bio11	最冷季平均温度	℃
Bio12	年降水量	mm
Bio13	最湿月降水量	mm
Bio14	最干月降水量	mm
Bio15	降水量季节性变异系数	-
Bio16	最湿季降水量	mm
Bio17	最干季降水量	mm
Bio18	最热季降水量	mm
Bio19	最冷季降水量	mm
DEM	海拔	m

为避免多变量间多重共线性导致模型过度拟合，进而影响模型运算结果，运用ENMTools软件对本研究所选取的20个因子进行相关性分析，当部分因子间相关系数$|r|\geq 0.8$时，剔除贡献率较小的因子[17]。筛选后杯花菟丝子、原野菟丝子、单柱菟丝子分别保留11个、10个、10个环境变量因子（表2）。

表2 用于构建模型的环境变量因子

Tab. 2 The environment variable factors used to build the model

物种	代码
杯花菟丝子	Bio1、Bio2、Bio3、Bio4、Bio9、Bio11、Bio12、Bio13、Bio14、Bio15、DEM
原野菟丝子	Bio1、Bio2、Bio3、Bio4、Bio6、Bio9、Bio14、Bio15、Bio18、DEM
单柱菟丝子	Bio1、Bio2、Bio3、Bio4、Bio7、Bio10、Bio13、Bio15、Bio19、DEM

1.3 最大熵模型构建、优化

MaxEnt模型参数中选择不同的倍频（Regularization Multiplier，RM）和特征组合（Feature Combination，FC）可以构建多种模型。为探寻最佳组合参数，提高模型的预测精度[18]，使用R语言平台运行kuenm包，对本研究中3种植物的MaxEnt模型进行优化，将RM设置成0.1~4.0，每次递增0.1，共40个调控倍频，依次与线性、二次型、乘积型、阈值型、片段化型5种特征类型进行排列组合，通过遗漏率和Akaike信息量准则评估不同参数组合下的拟合度和复杂度，以确定最佳模型的参数设置[19]，及优化后用于构建最大熵模型的倍频、特征组合参数（表3）。

将目标植物有效分布点位和筛选后环境变量导入MaxEnt模型，随机选取75%分布数据用于构建模型，其余25%分布数据用于测试检验，根据优化结果选择最优倍频和特征组合，其他设置选项保持默认，重复运算10次。

1.4 模型评估与适生等级划分

通过受试者工作特征曲线（ROC曲线）下面积

表3 基于kuenm包优化的MaxEnt参数设置

Tab. 3 MaxEnt parameter settings optimized based on the kuenm package

类型	物种	特征组合	倍频	信息量准则
默认	杯花菟丝子	LQPH	1	32.93
	原野菟丝子	LQPH	1	40.83
	单柱菟丝子	LQPH	1	82.31
优化	杯花菟丝子	QPT	1.6	0
	原野菟丝子	QPT	2.8	0
	单柱菟丝子	QPT	1.9	0

AUC值评价模型预测准确性[19]。AUC越接近1,预测结果精度越高,>0.9表示精度极高。杯花菟丝子、原野菟丝子、单柱菟丝子的AUC分别为0.9、0.945、0.933,表明预测结果准确可信。

使用ArcGIS 10.4.1软件中重分类工具,参考自然断点法(Natural Breaks)对3种植物适生区划分结果,统一将其适生区划分为4个等级:高适生区[0.55~1.00)、中适生区[0.25~0.55)、低适生区[0.10~0.25)、非适生区[0.00~0.10),并统计每个气候情景下适生区面积[20]。同时使用栅格计算中"乘""加"方法,将当前气候情景下3种菟丝子属植物的潜在适生区(0.10~1.00)的栅格图层进行叠加,得到3种菟丝子属植物共同分布的适生区域。

2 结果与分析

2.1 影响3种菟丝子属植物潜在分布的主要环境变量

通过气候变量对MaxEnt模型构建的贡献率可知(图1),气候因子是影响3种菟丝子属植物潜在分布的主导因子,其中降水量季节性变异系数(Bio15)对杯花菟丝子和单柱菟丝子潜在分布的影响最大,原野菟丝子受最冷月最低温度(Bio6)的影响最大,海拔因子对3种植物潜在分布的影响都很小。

物种对各种环境因子的偏好可以通过适应性曲线来体现,当存在概率高于0.5时意味着该环境条件对于该物种的生长最适宜。从图2可以看出杯花菟丝子存在概率随着最干季平均温度、年平均温度、最湿月降水量的升高呈先上升后降低的趋势,与降水量季节性变异系数呈负相关关系。原野菟丝子存在概率随着年平均温度、最冷月最低温度、昼夜温差与年温差比值、最干季平均温度的升高呈上升趋势,当年平均温度>25.75 ℃、最冷月最低温度>17.67 ℃、最干季平均温度>24.93 ℃时处于较高且平稳状态。单柱菟丝子存在概率随着降水量季节性变异系数、最湿月降水量、昼夜温差月均值的升高呈下降趋势,随着温度季节性变异系数的上升呈上升趋势。

2.2 当前气候情景下3种菟丝子属植物在中国的潜在适生区

根据MaxEnt模型预测结果显示(图3、图4),在当前气候条件下杯花菟丝子在中国总适生区面积为588.54×10⁴ km²,约占中国国土面积的61.09%,主要分布在我国西北、华北、东北以及西南地区的部分区域,其中高适生区主要集中在新疆北疆地区以及新疆南疆西北部、甘肃西北部、西藏南部局部地区,除了高适生区周边区域外中适生区主要集中在甘肃、宁夏、陕西、山西、内蒙古以及黑龙江、吉林、辽宁,并在青海、四川、云南、山东、河北、河南有局域分布;原野菟丝子在中国总适生区为117.45×10⁴ km²,约占中国国土面积的12.19%,其高适生区主要分布在我国东南沿海地区以及新疆天山山脉南北少部

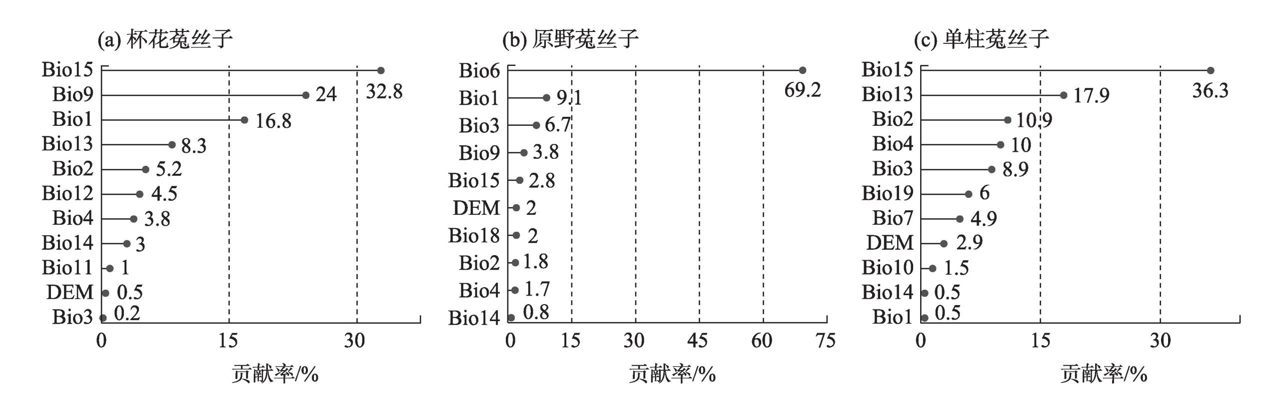


图1 参与建模的环境因子贡献率

Fig. 1 Contribution rate of environmental factors involved in the modeling

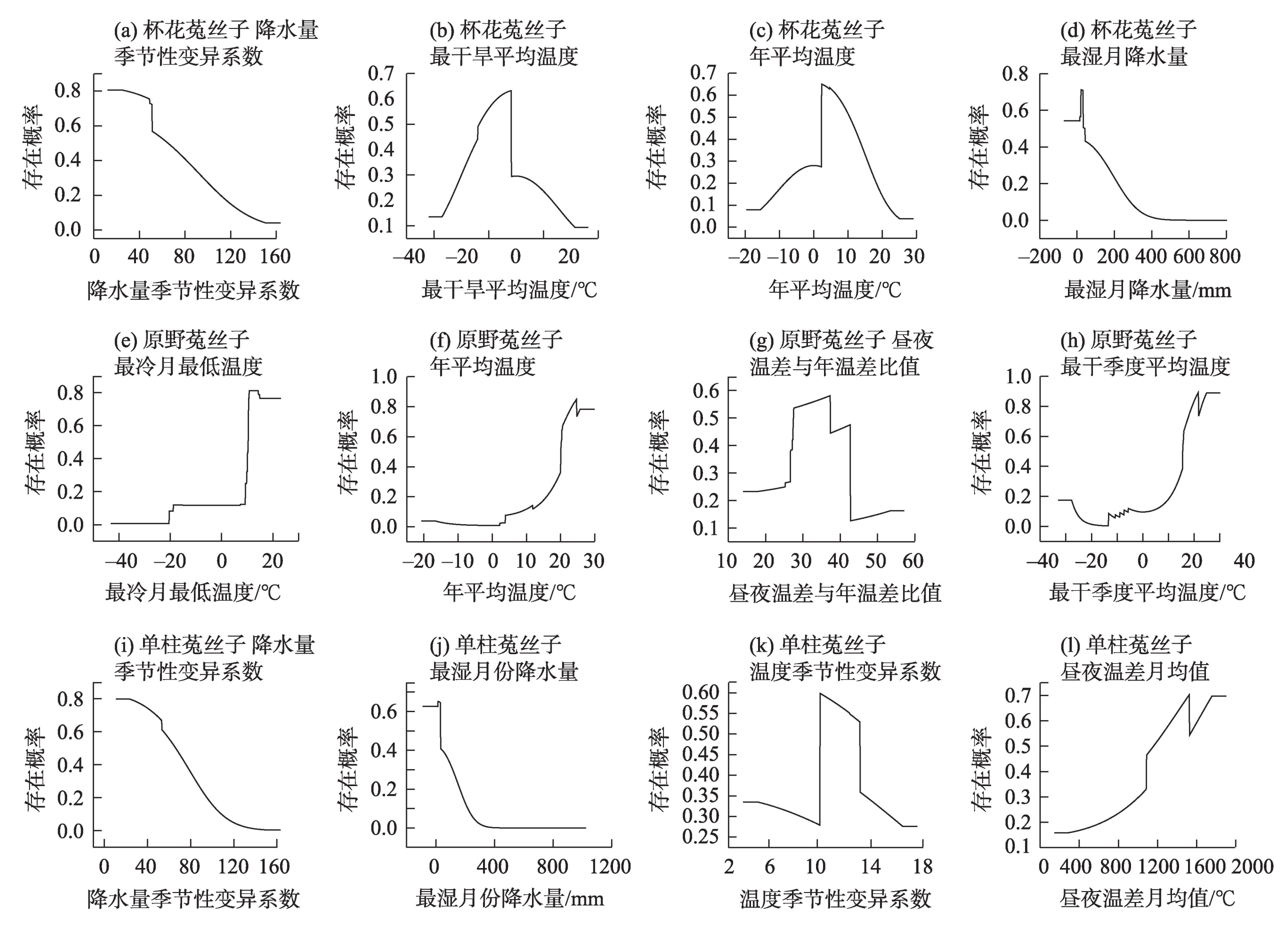


图2 主要环境变量的响应曲线

Fig. 2 Response curves for major environment variabl

分地区，而中适生区面积除了分布在高适生区周边区域外，大部分分布在广西和福建，小部分分布在江西、西藏和内蒙古；单柱菟丝子在中国总适生区为258.52×10⁴ km²，约占中国国土面积的26.83%，主要集中在西北地区并在东北、华北、华中、西南地区有零星分布，高适生区主要集中在新疆北部和西部以及西藏中部部分地区，中适生区除了分布在高适生区周边区域外，大部分集中分布在甘肃、陕西、山西、湖北、四川交界处，零星分布在内蒙古、青海、贵州、重庆。

通过适生区叠加分析，得到在当前气候情景下杯花菟丝子、原野菟丝子、单柱菟丝子3种植物适生区共同重叠区域(图3)，其中3种植物适生区叠加适生区总面积为673.44×10⁴ km²，约占中国面积的70.15%，每个省份都至少存在一种菟丝子属植物的适生区，3种植物共同存在的适生区域集中在我国的西北地区(新疆大部分区域以及内蒙古、甘肃小部分区域)。

2.3 未来气候情景下3种菟丝子属植物在中国的潜在适生区

未来不同时期气候情景下3种菟丝子属植物的适生区预测结果及面积变化情况如图4、图5所示。与当前气候条件相比，杯花菟丝子的总适生区都呈现不同程度的减少；原野菟丝子总适生区面积则在未来两个时期都呈现不同程度的增加；单柱菟丝子总适生区面积则是呈现出先增加再减少的情况。但与当前相比，未来各个时期3种菟丝子属植物的高适生区都有不同程度的增加。

2.4 未来气候情景下3种菟丝子属植物潜在分布区的质心迁移

图6显示杯花菟丝子适生区质心位置变化主要在甘肃省东北部，整体呈现出不断向西北方向迁移的趋势；原野菟丝子质心位置主要分布在四川省北部，且质心变化幅度较大，先后向东北、西北方向移动；单柱菟丝子的质心位置主要分布在甘肃省北部，未来各个时期单柱菟丝子质心虽然在东西方向

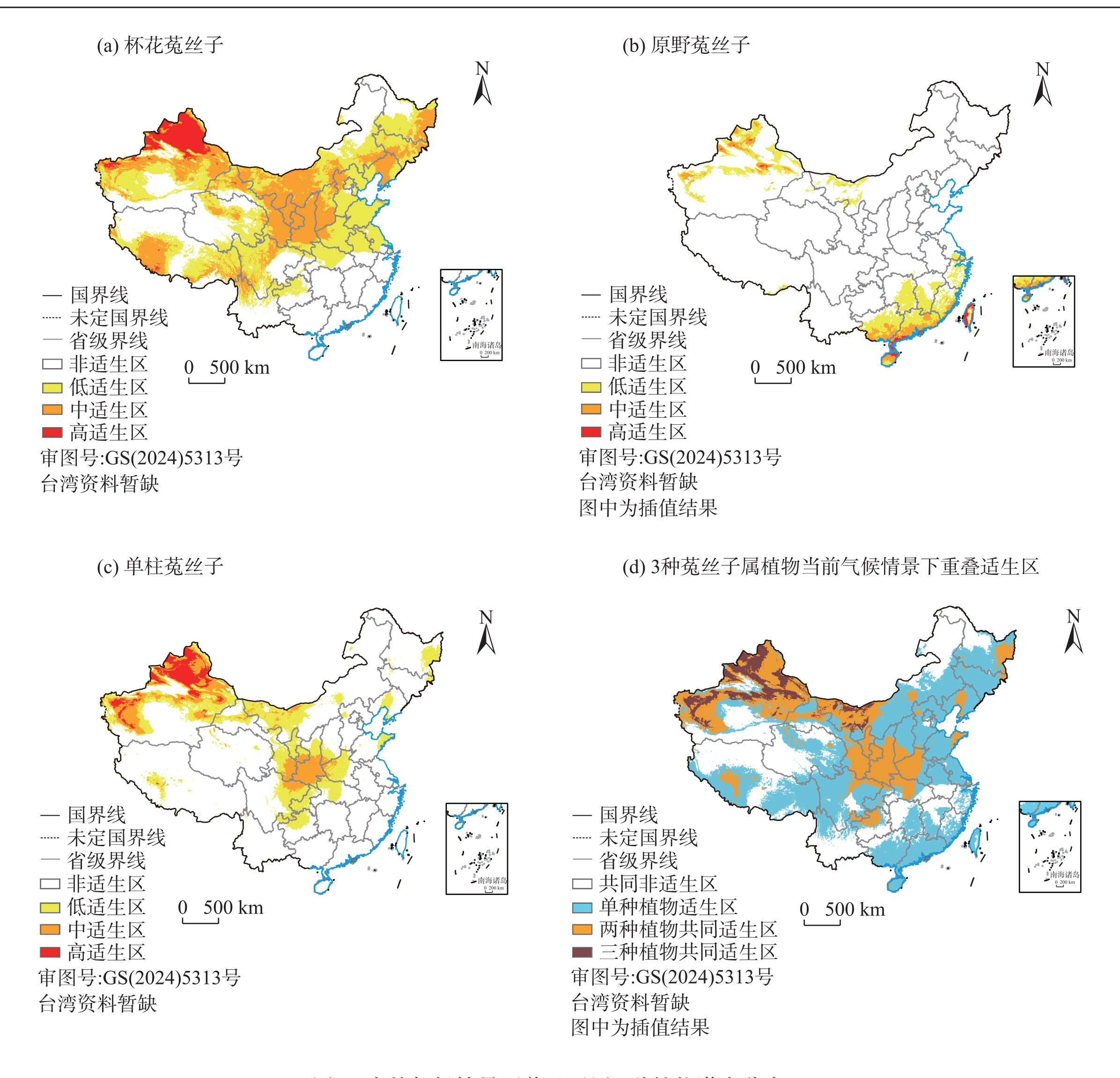


图3　当前气候情景下菟丝子属3种植物潜在分布区

Fig. 3　Potential distribution areas of three species of *Cuscuta* under current climate conditions

上迁移幅度较大但均在当前时期质心北部。

2.5　当前气候情景下3种菟丝子属植物潜在适生区与土地利用类型叠加分析

从杯花菟丝子、原野菟丝子、单柱菟丝子3种植物当前气候情景下潜在适生区的土地利用类型发现（图7、表4），3种菟丝子属植物的适生区大部分土地已经被开发利用。其中，杯花菟丝子潜在适生区未利用土地面积为154.78×10^4 km^2，占适生区面积的26.30%；原野菟丝子潜在适生区未利用土地面积为23.75×10^4 km^2，占适生区面积的20.22%；单柱菟丝子潜在适生区未利用土地面积为91.79×10^4 km^2，占适生区面积的35.10%。

3　讨 论

入侵植物的扩散增殖将会对本土生物多样性和生态系统造成极大影响，菟丝子属植物不仅具有极强的入侵性，而且全属均被列为检疫植物，其结实量大，茎缠绕寄生的特殊生理结构使得在自然环境下占领生态位的过程中鲜有对手。本研究使用MaxEnt模型模拟了中国范围内杯花菟丝子、原野菟丝子、单柱菟丝子的潜在分布，预测精准度分别达到了0.900、0.945、0.933，表明3种植物的预测结果准确可靠。菟丝子属植物适生区范围广泛，我国各省均至少存在一种菟丝子属植物的潜在适生区，但

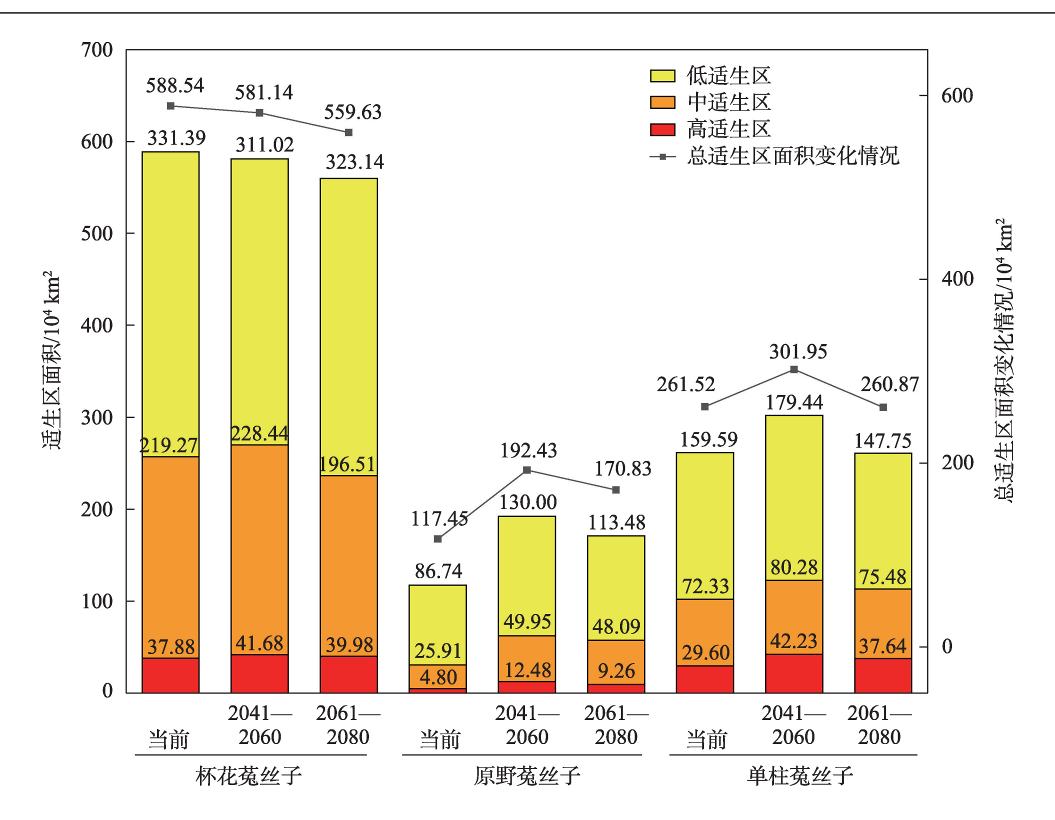


图4 不同时期菟丝子属3种植物潜在适生区面积

Fig. 4 Potential suitable area of three species of *Cuscuta* in different periods

每种植物又具有一定地域性[21-22]，本研究结果表明影响杯花菟丝子、原野菟丝子、单柱菟丝子潜在地理分布的环境因子不尽相同，且主导因子的生态位参数存在差异，这可能是菟丝子属植物分布广泛的原因。同时气候因子是影响菟丝子属植物分布的主要因子，海拔对其影响不大，与任子春[23]研究认为气候因子是限制菟丝子属分布的主导因子一致。

原野菟丝子原产于北美洲，1986年作为入侵植物首次在福建被报道[24]，目前在台湾地区、新疆分布点众多。最冷月最低温（10.38~23.11 ℃）是影响原野菟丝子潜在地理分布的主导因子，这与Goldwasser等[25]研究结果一致，低温下原野菟丝子几乎不萌发。台湾地区最冷2月平均气温在15 ℃左右[26]，常年如夏，全年均适宜原野菟丝子萌发，GBIF数据库中收录台湾地区分布点位众多，表明原野菟丝子在台湾地区已经泛滥。杯花菟丝子原产于北非、亚洲西南部、欧洲南部[24]，适生区模拟结果与原野菟丝子差异较大，可能是由于物种自身的生物学特性差异导致，任子春[23]对菟丝子属另外5种植物适生区进行预测，部分菟丝子属植物的适生区也差异明显，这也说明菟丝子属植物较强的环境适应能力。单柱菟丝子未作为入侵植物被收录，但其当前全球分布地与入侵植物杯花菟丝子相似[24,27]，但中低适生区面积明显少于杯花菟丝子，可能是由于单柱菟丝子受降水影响更大，Esmall等[28]研究表明单柱菟丝子在含水量高的土壤中不易萌发。并且两种入侵菟丝子植物均被报道低温胁迫对其种子萌发存在促进作用[29-30]，而新疆地区降雪早，雪期长，夏季高温，雪水资源丰富，地域辽阔，菟丝子属植物在新疆还有很大的扩张空间。

在全球气候持续变暖的趋势下，大多数动植物都有向两极迁移的趋势[31-32]，但其迁移方向和幅度因物种差异和环境复杂性等因素而存在不确定性[33]。本研究发现，随着未来全球暖湿化的趋势，杯花菟丝子、原野菟丝子、单柱菟丝子的高适生区都出现不同程度的增长，总适生区都表现出向我国北方高纬度扩张的趋势。吉林、内蒙古、宁夏、陕西、山东、江苏、贵州等省当前暂无3种菟丝子属植物的分布点，但均至少存在两种菟丝子的潜在适生区，其中内蒙古存在以上3种菟丝子植物的潜在适生区，未来需谨防菟丝子属植物向新区域扩散。此外3种菟丝子植物在新疆均存有高适生区，当前全球菟丝子

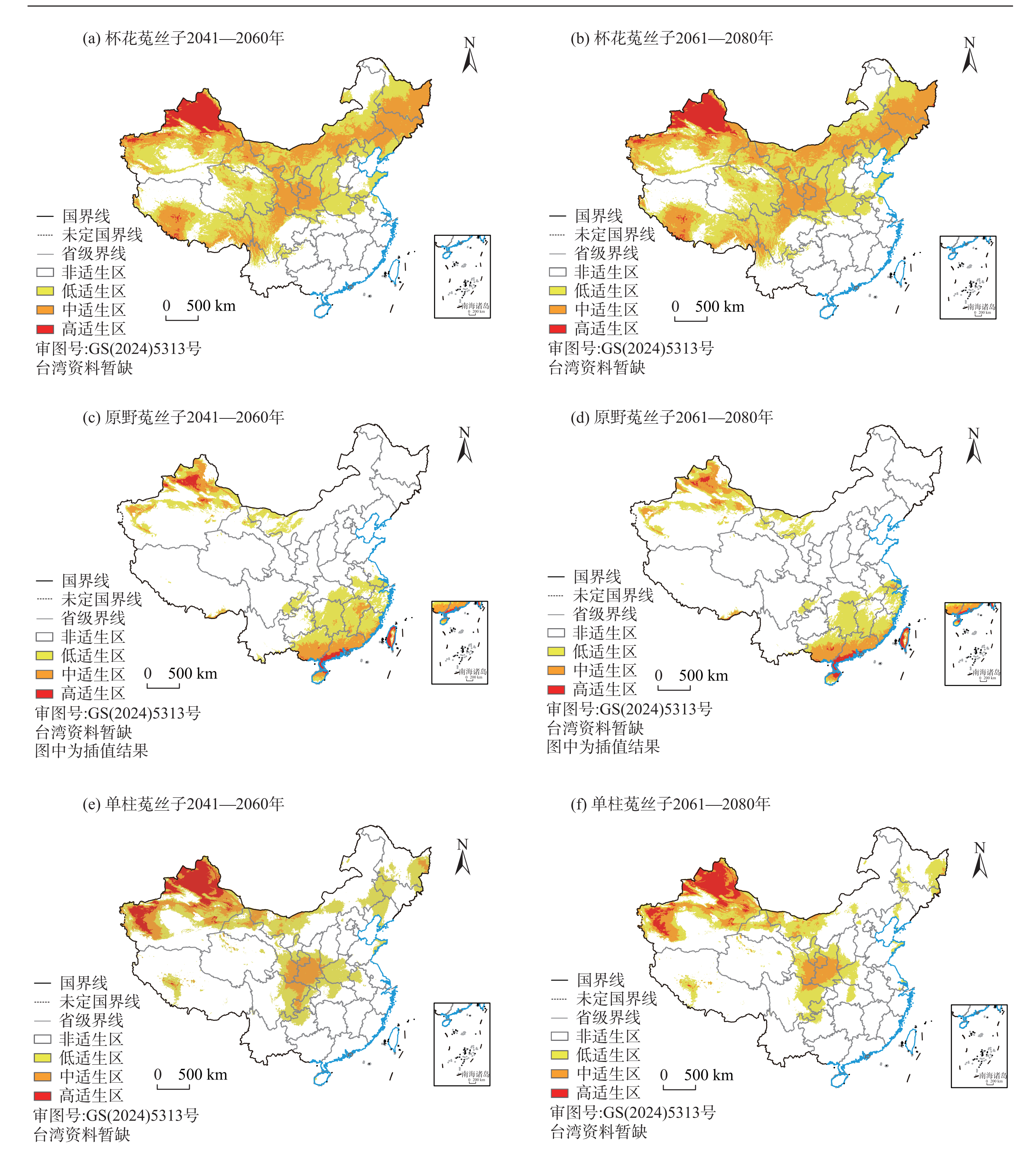


图5　未来不同气候情景下菟丝子属3种植物潜在分布区

Fig. 5　Potential distribution areas of three species of *Cuscuta* under different climatic scenarios in the future

属植物约有170种,我国有8种,新疆7种[34],新疆作为重要的经济文化交流渠道,口岸众多,因而要高度重视检疫杂草菟丝子属植物的传入与扩散。并且在高精度预测的结果基础上将当前气候情景下3种菟丝子属植物总适生区与土地利用数据进行叠加分析,结果表明大部分土地已被开发利用,相关地区应予以重视,减少或避免菟丝子属植物入侵后对当地生态系统产生的负面影响,同时在对未开发

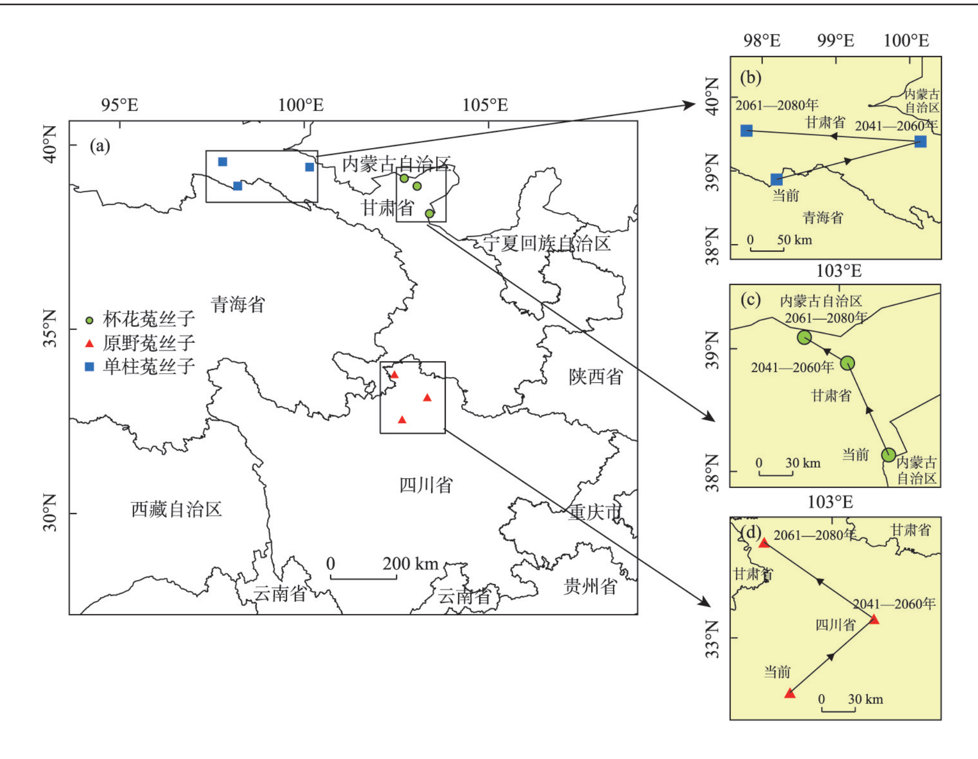


图6 不同时期3种菟丝子属植物适生区质心的迁移路线

Fig. 6 The migration routes of centroid in three species of *Cuscuta* in different periods

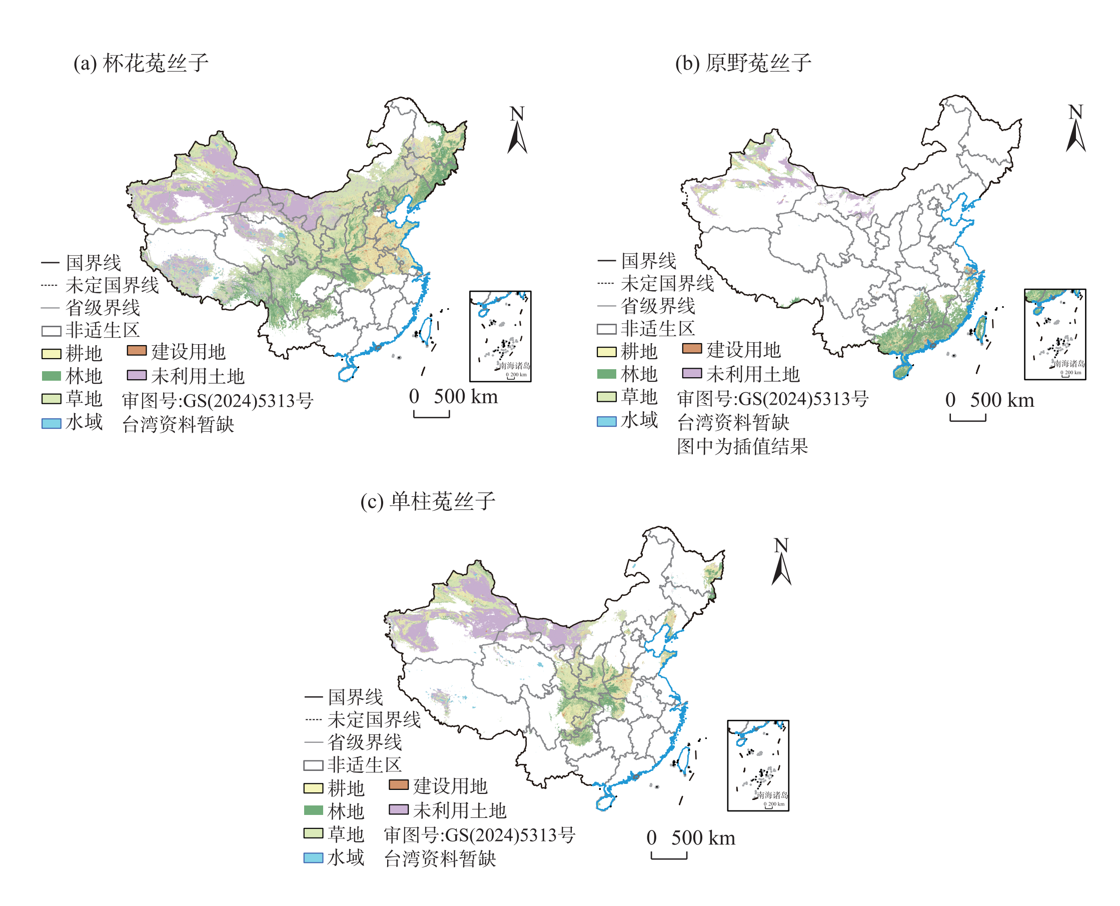


图7 当前气候情景下3种菟丝子属植物潜在适生区土地利用类型分布

Fig. 7 Distribution of land types in three potential suitable areas of *Cuscuta* under current climate scenario

表4 当前气候情景下3种菟丝子属植物潜在适生区中土地利用类型分布比例

Tab. 4 Distribution proportion of land use types in three potential suitable areas of *Cuscuta* species under current climate scenarios

土地利用类型	耕地/%	林地/%	草地/%	水域/%	建设用地/%	未利用土地/%	总适生区面/10^4 km^2
杯花菟丝子	20.69	16.80	30.53	2.44	3.24	26.30	588.54
原野菟丝子	21.62	37.13	13.71	2.82	4.50	20.22	117.45
单柱菟丝子	21.86	13.05	24.95	2.53	2.51	35.10	261.52

土地进行改造利用时也要小心菟丝子属植物的侵入,早预防,早防治,争取在其形成入侵前对其进行消除。

4 结 论

基于最大熵模型和物种分布数据,得到当前气候情景下,杯花菟丝子和单柱菟丝子的高适生区主要集中在新疆地区,原野菟丝子的高适生区较少,主要在台湾地区、海南省北部、广东省南部沿海及新疆少部分地区,且全国各省至少存在一种菟丝子属植物适生区。3种菟丝子属植物适生区的大部分土地已经被开发利用,其植被区系易受到菟丝子属植物的影响。降水和温度均是制约菟丝子属植物当前及未来潜在分布的主要驱动因子,海拔对适生区分布的贡献率相对较小。在未来不同时期气候情景下,3种菟丝子属植物高适生区面积均呈现不同程度的增加,并且总适生区质心均表现为向我国北部转移趋势。综上,菟丝子属植物会在未来逐步升温的情景下获益,潜在高适生区将进一步增加,内蒙古、吉林、宁夏、陕西、山东、江苏、贵州等省虽暂无分布但存在其潜在适生区,需警惕侵入。新疆地区气候条件与菟丝子属植物生活习性契合,需加强对菟丝子属植物的防治。该研究结果可为菟丝子属3种植物的监测预警和科学防控提供重要理论支撑。

参考文献(References):

[1] 周杰, 王旭虎, 杜维波, 等. 气候变化背景下的天山云杉潜在分布区预测[J]. 干旱区研究, 2024, 41(7): 1167-1176. [Zhou Jie, Wang Xuhu, Du Weibo, et al. Prediction of potential distribution area of *Picea schrenkiana* under the background of climate change[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(7): 1167-1176.]

[2] 王丽丽, 杨采青, 王瑛, 等. 全球入侵物种马铃薯块茎蛾生态位转移及适生区扩展[J]. 应用生态学报, 2024, 35(3): 797-805. [Wang Lili, Yang Caiqing, Wang Ying, et al. Ecological niche shift and suitable area expansion of a globally invasive species *Phthorimaea operculella*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(3): 797-805.]

[3] Amirmoradi S, Moghaddam P R, Noghabi M A. Effect of *Cuscuta* (dodder) on quality and quantity traits of *Sugar Beet* in Chenaran, Khorasan Razavi Province[J]. Iranian Journal of Field Crops Research, 2012, 8(6): 965-74.

[4] 罗瑞萍, 赵志刚, 赵越, 等. 3个主栽大豆品种被菟丝子寄生危害的差异性研究[J]. 农业灾害研究, 2016, 6(1): 3-4. [Luo Ruiping, Zhao Zhigang, Zhaoyue, et al. Study on the damage difference of three main soybean cultivars to dodder parasitizing[J]. Journal of Agricultural Catastrophology, 2016, 6(1): 3-4.]

[5] 尚佰晓. 菟丝子属植物在园林绿化中的危害调查及防治[J]. 园艺与种苗, 2022, 42(8): 28-32. [Shang Baixiao. Hazard investigation and control of *Cuscuta* plants in landscaping[J]. Horticulture & Seed, 2022, 42(8): 28-32.]

[6] 周鑫, 瞿巧文, 吴夏华. 菟丝子对林木的危害及其防治[J]. 北方农业学报, 2013(6): 93. [Zhou Xin, Qu Qiaowen, Wu Xiahua. Harm of *Cuscuta chinensis* to forest trees and its control[J]. Journal of Northern Agriculture, 2013(6): 93.]

[7] 陈莹, 兰芳, 刘金平, 等. 日本菟丝子对园林植物危害度及适应性生长的研究[J]. 四川林业科技, 2023, 44(1): 32-39. [Chen Ying, Lan Fang, Liu Jinping, et al. Effects of *Cuscuta japonica* on the harmfulness and adaptive growth of garden plants in Nanchong[J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2023, 44(1): 32-39.]

[8] Qu X J, Fan S J. First report of the parasitic invasive weed field dodder (*Cuscuta campestris*) parasitizing the confamilial invasive weed common morning-glory (*Ipomoea purpurea*) in Shandong, China. [J]. Plant Disease, 2021, 105(4): 1230.

[9] 余波, 瞿添添, 刘应蛟, 等. 菟丝子和大菟丝子形态组织研究与分类学意义[J]. 种子, 2023, 42(10): 57-64. [Yu Bo, Qu Tiantian, Liu Yingjiao, et al. Morphlogical organization and taxonomic significance of *Cuscutae semen* and *Cuscutae japonicae semen*[J]. Seed, 2023, 42(10): 57-64.]

[10] Yuan Y G, Oduor A M, Zhao Y Y, et al. Parasitism by *Cuscuta gronovii* mediated soil legacy effects and the competitive ability of invasive and native plant species by changing soil abiotic and biotic properties[J]. Applied Soil Ecology, 2024, 202: 105583.

[11] 周冰颖, 刘霞, 谢伟, 等. 我国长江流域园林常见菟丝子及其防治方法[J]. 杂草学报, 2022, 40(3): 8–13. [Zhou Bingying, Liu Xia, Xie Wei, et al. Common dodder in Chinese gardens of Yangtze River Basin and its control mehods[J]. Journal of Weed Science, 2022, 40(3): 8–13.]

[12] 陈鲁宁, 胡扬, 辛国松, 等. 菟丝子化学成分、药理作用研究进展及其质量标志物(Q-Marker)预测[J]. 中草药, 2024, 55(15): 5298–5314. [Chen Luning, Hu Yang, Xin Guosong, et al. Research progress on chemical constituents, pharmacological effects of *Cuscutae Semen* and its quality marker prediction[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2024, 55(15): 5298–5314.]

[13] Zhou Y C, Zhang Z X, Zhu B, et al. MaxEnt modeling based on CMIP6 models to project potential suitable zones for *Cunninghamia lanceolata* in China[J]. Forests, 2021, 12(6): 752.

[14] 张晓玮, 蒋玉梅, 毕阳, 等. 基于MaxEnt模型的中国沙棘潜在适宜分布区分析[J]. 生态学报, 2022, 42(4): 1420–1428. [Zhang Xiaowei, Jiang Yumei, Bi Yang, et al. Identification of potential distribution area for *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* by the MaxEnt model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(4): 1420–1428.]

[15] 胡永云. 复杂气候系统和全球变暖[J]. 物理, 2022, 51(1): 10–15. [Hu Yongyun. The complex climate system and global warming [J]. Physics, 2022, 51(1): 10–15.]

[16] 田叙辰, 魏洪玲, 解胜男, 等. 基于MaxEnt模型的东北地区槭树潜在地理分布[J]. 生态环境学报, 2024, 33(4): 509–519. [Tian Xuchen, Wei Hongling, Xie Shengnan, et al. Potential geographical distribution of *Acer* in Northeast China based on the MaxEnt model[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2024, 33(4): 509–519.]

[17] 段义忠, 王佳豪, 王驰, 等. 未来气候变化下西北干旱区4种扁桃亚属植物潜在适生区分析[J]. 生态学杂志, 2020, 39(7): 2193–2204. [Duan Yizhong, Wang Jiahao, Wang Chi, et al. Analysis on the potential suitable areas of four species of the subgen. *Amygdalus* in arid Northwest China under future climate change [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(7): 2193–2204.]

[18] Warren D L, Seifert S N. Ecological niche modeling in Maxent: The importance of model complexity and the performance of model selection criteria[J]. Ecological applications: A publication of the Ecological Society of America, 2011, 21(2): 335–342.

[19] Muscarella R, Galante P J, Soley-Guardia M, et al. ENM eval: An R package for conducting spatially independent evaluations and estimating optimal model complexity for Maxent ecological niche models[J]. Methods in Ecology and Evolution, 2014, 5(11): 1198–1205.

[20] 吴帆, 刘国豪, 谢鑫, 等. 未来气候变化对金花茶分布格局的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2024, 39(3): 144–151. [Wu Fan, Liu Guohao, Xie Xin, et al. Effects of future climate change on distribution pattern of *Camellia petelotii*[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2024, 39(3): 144–151.]

[21] Zhao Q, Mi Z Y, Chan L, et al. Predicting potential distribution of *Ziziphus spinosa* (Bunge) H. H. Hu ex F. H. Chen in China under climate change scenarios[J]. Ecology and Evolution, 2022, 12(2): e8629.

[22] 艾尼古丽·依明. 石河子地区菟丝子种类鉴定、生物学特性研究及生防菌筛选[D]. 石河子: 石河子大学, 2017. [Ainiguli. Yiming. Species Identification, Biological Characteristics Study, and Screeningof Control Strain of Parasitic Weed *Cuscuta* in Shihezi [D]. Shihezi: Shihezi University, 2017.]

[23] 任子春. 基于Maxent模型在全球变暖条件下菟丝子属全寄生植物及其寄主的潜在分布预测[D]. 太原: 山西师范大学, 2020. [Ren Zichun. Potential Distribution Prediction of Holoparasitic *Cuscuta* Plantsand their Hosts under Global Warming Based on Maxent Model[D]. Taiyuan: Shanxi Normal University, 2020.]

[24] 马金双. 中国入侵植物名录[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013: 131–133. [Ma Jinshuang. The Checklist of the Chinese Invasive Plants[M]. Beijing: Higher Education Press, 2013: 131–133.]

[25] Goldwasser Y, Miryamchik H, Rubin B, et al. Field dodder (*Cuscuta campestris*) a new model describing temperature-dependent seed germination[J]. Weed Science, 2016, 64(1): 53–60.

[26] 杨鑑初. 台湾温度初步分析[J]. 气象学报, 1950, 21(1): 47–52. [Yang Jianchu. Preliminary analysis of temperature in Taiwan[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1950, 21(1): 47–52.]

[27] Piwowarczyk R, Góralski G, Denysenko-Bennett M, et al. First report of eastern dodder (*Cuscuta monogyna*) parasitizing Licorice (*Glycyrrhiza glabra*) in Armenia[J]. Plant Disease, 2018, 102(12): 2664.

[28] Esmall E, Izadi D E, Rashed M M H, et al. Seed germination and seedling emergence in two populations of eastern dodder (*Cuscuta monogyna* Vahl.): Evaluation of environmental factors and burial depth[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2022, 44(2): 26.

[29] Yergin-Ozkan R, Tepe I. Emergence characteristics and germination physiology of smoothseed alfalfa dodder (*Cuscuta approximata* Bab.)[J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2018, 27(1): 104–109.

[30] Saric-Krsmanovic M, Bozic D, Pavlovic D, et al. Temperature effects on *Cuscuta campestris* Yunk. seed germination[J]. Pesticidi i Fitomedicina, 2013, 28(3): 187–193.

[31] Roberts D R, Hamann A. Predicting potential climate change impacts with bioclimate envelope models: A palaeoecological perspective[J]. Global Ecology and Biogeography, 2012, 21(2): 121–133.

[32] Ziska L H, Mcconnell L L. Climate change, carbon dioxide, and pest biology: Monitor, mitigate, manage[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(1): 6–12.

[33] Guo F Y, Lenoir J, Bonebrake T C. Author Correction: Land-use change interacts with climate to determine elevational species redistribution[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 3485.

[34] 新疆植物志编辑委员会. 新疆植物志·简本[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版总社, 新疆科技卫生出版社, 2014: 343–344. [Commissione Redactorum Florae Xinjianggensis. Flora Xinjiangensis (the Brief Edition) [M]. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House, Xinjiang Science and Technology Press, 2014: 343–344.]

Potential geographic distribution of the three species of *Cuscuta* in China under climate scenarios

QU Yuyang, WEN Tiantian, LIU Jiamin, YAN Ping
(College of Life Sciences, Shihezi University, Shihezi 832003, Xinjiang, China)

Abstract: *Cuscuta* plants are classified as quarantine plants due to their parasitic stem characteristics, and it is important to investigate the potential spatial distribution characteristics of *Cuscuta* plants in China for effective control. In this study, three species of *Cuscuta* (*C. cupulata*, *C. campestris* and *C. monogyna*) were selected as the research subjects. Based on 932 records of geographical distribution, 144 records of field investigation and 20 environmental variables, the maximum entropy model and ArcGIS were used to predict potential niche distributions under current and future scenarios (2041−2060, 2061−2080) considering of greenhouse gas emissions from SSP2−4.5. The suitable areas for the 3 species of *Cuscuta* under the current climate conditions and land use date were analyzed. The results showed that: (1) The area under the work characteristic curve (AUC) for all subjects was greater than 0.9 indicating high prediction accuracy. (2) The main environmental factors affecting the distribution of the three species of *Cuscuta* within their habitable zones with a relatively small contribution rate from topographic factors varied, but all of them were dominated by climatic factors. (3) Currently *C. cupulata* and *C. monogyna* distributions are concentrated in northern China, while *C. campestris* is not only distributed in the north, but also concentrated in southeastern China, and in future scenarios they will expand further northward. (4) In the current period, most land areas suitable for these three species of *Cuscuta* have already been exploited.

Keywords: *Cuscuta*; MaxEnt model; potential suitable area; overlap of the suitable habitats; land use type